طرح مرمت برج خشتی شماره‌ی ۳۲ در ارگ بم★

مهرداد حجازی[۱]   بینا حجازی[۲]   حامد مهداد[۳]   صبا حجازی[٤]

چکیده *ارگ بم بزرگ‌ترین ارگ خشتی جهان در شهرستان بم کرمان، تحت زلزله‌ی پنجم دی ماه ۱۳۸۲ به‌شدت آسیب دید. از آن زمان مطالعات و تحقیقات بسیاری برای مرمت و احیای این مجموعه‌ی تاریخی انجام شده است. برج خشتی ۳۲ یکی از اولین سازه‌ها در این ارگ بود که در طی یک پروژه، طرح مرمت آن تهیه و ارائه شد. هدف این پروژه، مطالعه‌ی رفتار لرزه‌ای برج به‌منظور تعیین دلیل آسیب‌های وارد شده، نواحی ضعیف این سازه در زلزله‌های آتی، بهترین راه برای بهبود رفتار لرزه‌ای، و مناسب‌ترین طرح مرمت بوده است. این مقاله دربرگیرنده مطالعات رفتار لرزه‌ای و طرح مرمت برج ۳۲ می‌باشد.*

واژه های کلیدی برج خشتی، رفتار لرزه‌ای، مرمت، ارگ بم.

Restoration Plan of Adobe Tower No. 32 in the Bam Citadel

M. Hejazi   B. Hejazi   H. Mehdad   S. Hejazi

Abstract *The world largest adobe citadel in Bam (Arg-e Bam) was damaged seriously in the 26 December 2003 earthquake. Since then many studies and researches have been done to restore this historical complex. One of the first structures in the citadel for which a restoration plan was prepared over a project was adobe tower No. 32. The objective of this project was studying the seismic behaviour of the tower to find out the cause of damage, the weakest parts of the structure in future earthquakes, the best way to improve the seismic performance, and the most approperiate restoration plan. This paper presents the study on seismic behaviour of tower No. 32 and its restoration plan.*

Keywords Adobe Tower, Seismic Behaviour, Restoration, Bam Citadel

★ تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۱/۱۲/۰٤ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۸/۲۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسئول : دانشیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.

(۲) کارشناس مهندسی معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان).

(۳) کارشناس ارشد سازه دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد.

(٤) دانشجوی کارشناسی مهندسی معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان.

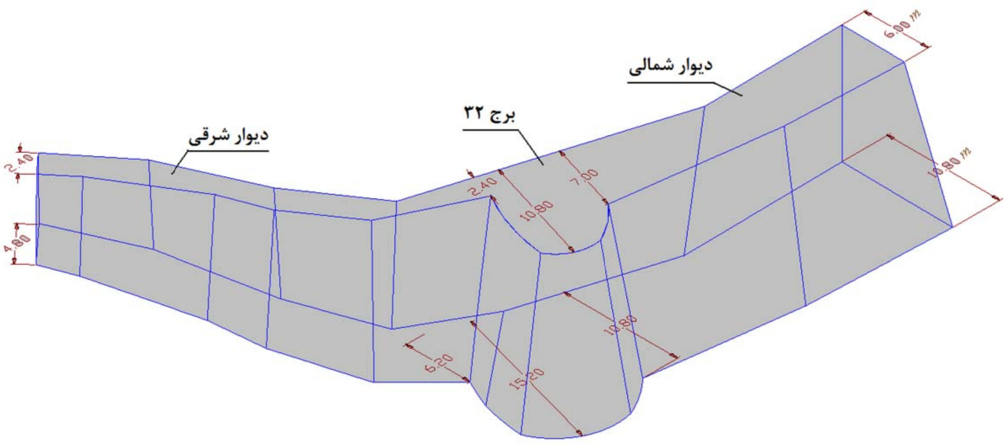
مقدمه

ارگ بم. ارگ بم با وسعتی قریب بـه ۲۰۰۰۰۰ مترمربـع (شکل ۱) بزرگ‌ترین مجموعـه‌ی خشـتی- گلـی جهـان به‌شمار می‌رود. این مجموعـه در طـی ۲۰۰۰ سـال عمـر خود تغییرات و بازسازی‌های بسـیاری را بـه خـود دیـده است. افزایش حجم و ظاهر بـرج و باروهـای پیرامـونی، هندسه‌ی نامتقارن، روش‌های نامناسـب احیـا و مرمـت و برخی الحاقات پی‌درپی در طـی ادوار تـاریخی مختلـف، باعث شده است که این مجموعـه در زلزلـه‌ی پـنجم دی ماه ۱۳۸۲ بم، دچار خرابی‌های گسترده شود [۲ و۱].

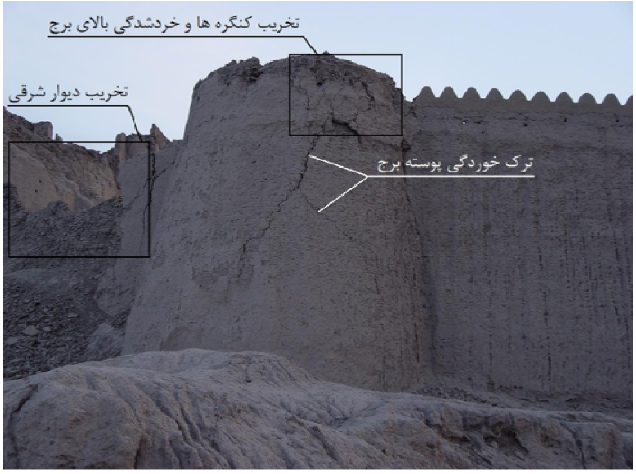
برج ۳۲. ساختار بـرج ۳۲ از خشـت بـوده اسـت و در گوشه‌ی شمال شرقی ارگ واقع شده اسـت. ایـن بـرج دایره‌ای شکل (از نمای بیرونـی) ۱۵ متـر ارتفـاع دارد. قطر آن در پایین ۱۵/۲ متر و در بالا ۱۰/۸ متر می‌باشـد (شکل ۲). در اثر زلزله تعدادی ترک‌خوردگی برشی بر روی لایه‌ی خارجی برج ایجاد شده و همین‌طور دیوار سمت شرقی آن تقریباً به‌طور کامل تخریب شده است، ولی دیوار سمت غربی برج (بخشـی از دیـوار شـمالی ارگ) دچار هیچ خسارتی نشده است (شـکل‌هـای ۳ و ٤). بررسی‌های باستان‌شناسی نشانگر وجـود هسـته‌ای به ضخامت حدوداً ۱/۵ متر درون برج و در دیوارهـای جانبی آن می‌باشد [۱].



شکل ۱ ارگ بم قبل از زلزله‌ی پنجم دی ۱۳۸۲



شکل ۲ هندسه‌ی برج ۳۲ و بخشی از دیوارهای جانبی آن



شکل ۳ خسارات وارد به لایه‌ی خارجی برج و دیوار شرقی آن در اثر زلزله



شکل ٤ برج ۳۲ و دیوارهای شرقی و شمالی ارگ بم

مرور پیشینه‌ی تحقیق

از دهه‌ی ۱۹۷۰ علاقه به مطالعه‌ی رفتار و بهسازی لرزه‌ای بناهای خشتی افزایش یافت و گروه‌های تحقیقاتی مختلفی پژوهش در این زمینه را آغاز نمودند. محققان دانشگاه کاتولیک پرو نقش مهمی در به‌دست آوردن اطلاعات در این زمینه و ارائه‌ی راهکارهای مقابله با زلزله ایفا نموده‌اند. نتایج تحقیقات سی و پنج ساله‌ی این گروه تا سال ۲۰۰۵ با جزئیات توسط وارگاس و همکاران [3] ارائه شده است. پروژه‌ی خشت‌لرزه ای گتی، که هنوز نیز ادامه دارد، در سال ۱۹۹۰ توسط مؤسسه‌ی حفاظت گتی به‌منظور توسعه‌ی روش‌های فنی برای بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌های خشتی با حداقل مداخله شروع شد. هدف دراز مدت این پروژه ایجاد و ارزیابی روش‌ها و ابزار طراحی برای معماران، مهندسان و صاحبان بناها بود. این پروژه سه مرحله داشت. مرحله‌ی اول شامل ارزیابی اطلاعات و روش‌های مقاوم‌سازی موجود و گسترش دستورالعمل‌های فنی موقت برای استفاده در مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌های خشتی بود. طی مرحله‌ی دوم، تحقیقات لازم برای توسعه‌ی فن‌آوری مقاوم‌سازی قابل قبول و برای تکمیل آنچه که در آن موقع شناخته شده بود، انجام شد. در مرحله‌ی سوم، مجموعه‌ای از دستورالعمل‌های برنامه‌ریزی و مهندسی برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌های خشتی تاریخی براساس نتایج تحقیقات و قضاوت حرفه‌ای تنظیم شد. این پروژه شامل انجام تعداد زیادی آزمایش میز لرزان

در ابعاد کوچک و بزرگ برای بررسی رفتار دیوارها و ساختمان‌های خشتی، و مطالعات دقیق ساختمان‌های خشتی آسیب‌دیده در زلزله‌ها بود [۱۰۱۲ و ۱۰۱٤]. آورامی و همکاران [۱۰۱۶] مروری کامل بر فعالیت‌های مؤسسه‌ی حفاظت گتی تا سال ۲۰۰۸ ارائه کرده‌اند. نوگوئز و ناوارو [۱۰٤۰] در سال ۲۰۰۵ چگونگی مرمت دیوارهای خشتی با شبکه‌هایی از مواد مصنوعی را با ساختن پنج دیوار به طول ۲/۳ m و ارتفاع ۲/۳ m، که دو عدد آنها از خشت‌های معمولی و سه عدد آنها از خشت‌های صنعتی ساخته شده بودند، تحت بار مرده و بار جانبی چرخه‌ای مورد آزمایش قرار دادند. دیوارهای با خشت‌های صنعتی از خود مقاومت و شکل‌پذیری بیشتری نشان دادند، هرچند در مواردی دچار گسیختگی‌های اساسی شدند. پس از مقاوم‌سازی دیوارهای آسیب‌دیده با شبکه‌هایی از مواد مصنوعی که بر روی آنها پوشش ماسه و سیمان کشیده شده بود، مشخص شد که این روش مقاوم‌سازی در برابر بارهای جانبی روشی مناسب می‌باشد. در سال ۲۰۰۷ یامین و همکاران [۱۰۶۰] ۱۸ دیوار خشتی به طول ۲/۵ m، ارتفاع ۲ m و ضخامت ۰/٤–۰/۵ m را تحت ترکیب بارهای قائم و بارهای افقی چرخه‌ای وارد در بالای دیوار قرار دادند. دیوارها از جنس خشت یا چینه و به‌صورت تقویت نشده، تقویت شده با شبکه، و تقویت شده با چوب بودند. آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از تقویت می‌تواند تا حدودی رفتار لرزه‌ای دیوارها را از طریق ایجاد پیوستگی و محصورشدگی سازه‌ای بهبود بخشد و آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌های خشتی را کاهش دهد. در سال ۲۰۱۳ فیگوئیردو و همکاران [۱۰۷۰] آزمایش‌هایی را بر روی یک دیوار خشتی تقویت نشده تحت بار افقی چرخه‌ای و سپس بر روی همان دیوار پس از مرمت توسط تزریق با فشار ملات آهک در داخل ترک‌ها و مقاوم‌سازی با شبکه‌ای از جنس مواد مصنوعی انجام دادند. آنان به این نتیجه رسیدند که در وضعیت مرمت و تقویت شده، رفتار لرزه‌ای دیوار به مقدار قابل‌توجهی بهبود یافته است. مطالعات علمی در مورد مقاوم‌سازی سازه‌های خشتی پس از وقوع زلزله‌ی بم در سال ۱۳۸۲ طی چند پروژه با مشارکت متخصصان ایرانی و خارجی از کشورهای فرانسه، آلمان و ژاپن و با هدایت پروژه‌ی نجات‌بخشی میراث فرهنگی ارگ بم شروع شد. این پروژه‌ها شامل مرمت برخی از سازه‌های مهم ارگ بم مانند برج ۱، خانه‌ی سیستانی، برج ۳۲ و بخشی از بازار با استفاده از روش‌های مختلف و متداول در کشورهای مذکور بود تا از نتایج آن بتوان در آینده برای تهیه‌ی یک دستورالعمل مناسب برای مرمت و مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌های خشتی استفاده نمود [14–۱۰و۱].

مراحل طرح مرمت

طرح مرمت براساس منشورها و دستورالعمل‌های جهانی، مانند منشور ونیز (منشور بین‌المللی برای حفاظت و مرمت بناها و محوطه‌ها) [15] و دستور العمل‌های ISCARSAH (توصیه‌هایی برای تحلیل و مرمت سازه‌های تاریخی (کمیته‌ی بین‌المللی تحلیل و مرمت سازه‌های میراث معماری) [16] تهیه شده است. این منشورها و دستورالعمل‌ها بر مطالعه و بررسی با دخل و تصرف حداقلی در جهت تغییرات و رعایت اصالت مصالح، تکنولوژی، گونه‌شناسی و شرایط محیطی بنا در طی عملیات مرمت، تأکید دارند. در این منشورها استفاده از مصالح بادوام و سازگار با نمونه‌های اصلی به‌منظور مرمت، توصیه شده و مداخله‌ی بسیار در بنا، چه مصالح و چه ساختار، منع گردیده است. هم‌چنین ذکر شده است که کلیه مداخلات باید، در جهت استفاده از مصالح و تکنولوژی‌های جدیدتر و مناسب‌تر در آینده برگشت‌پذیر باشند.

هدف اصلی طرح مرمت برج ۳۲ بازگرداندن وضعیت آن به شرایط قبل از زلزله است. برای دست‌یابی به این هدف نواحی مختلفی از سازه تثبیت، تقویت و مرمت خواهند شد. هم‌چنین برخی از قسمت‌های از بین رفته به شکل و فرم اصلی بازسازی خواهند گردید. مراحل طرح مرمت برج در جدول (۱) ارائه شده است. مراحل ۲، ٤، ۹ و ۱۰ در ادامه شرح داده خواهند شد.

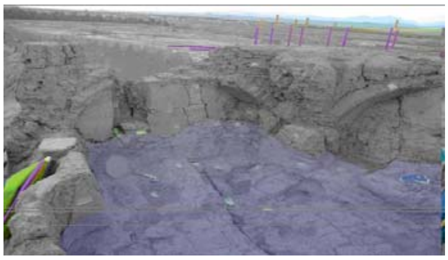
جدول ۱ مراحل طرح مرمت برج خشتی ۳۲

مرحله	شرح عملیات
۱	بررسی تاریخی بنا
۲	بررسی باستان‌شناسی بنا
۳	بررسی معماری و مستندات موجود در مورد شرایط فعلی بنا
٤	آسیب‌شناسی بنا
۵	تست‌های آزمایشگاهی برای تعیین خواص مکانیکی مصالح موجود
٦	بررسی تکنیک‌های بومی و محلی مرمت
۷	بررسی مواد در دسترس (مانند خاک، خشت، الیاف درخت خرما و ...) به‌منظور ترمیم بخش‌های موجود و بازسازی نواحی تخریب شده‌ی بنا
۸	انتخاب روش و مصالح مرمت براساس منشورهای بین‌المللی و نتایج تست‌های آزمایشگاهی
۹	آنالیز سازه‌ای بنای اصلی به‌منظور ارزیابی میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای آن
۱۰	بررسی صحت نتایج تحلیل سازه و طرح مقاوم‌سازی سازه بنا
۱۱	تهیه‌ی نقشه‌های مرمت و مقاوم‌سازی قسمت‌های موجود بنا و بازسازی نواحی تخریب شده
۱۲	پایان بررسی‌ها و تحقیقات
۱۳	اجرای طرح مرمت، بازسازی و مقاوم‌سازی لرزه‌ای بنا.

باستان‌شناسی برج ۳۲

در جهت شناخت واحدهای معماری و لایه‌های تشکیل دهنده‌ی برج ۳۲ واقع در حصار شمالی ارگ بم، گمانه‌هایی حفر شده است.

گمانه‌ی ۱: ناحیه‌ی بالای برج (کف اتاق نگهبانی).
در بالای برج اتاقی قرار دارد که در اثر زلزله پوشش گنبدی آن دچار ریزش گردیده است ولی دیوارهای اتاق با درصدی تخریب، باقی مانده‌اند (شکل ۵). این دیوارها از سه لایه تشکیل شده اند؛ خشت‌های ۳۷×۳۷×۷ سانتی‌متر در پایه‌ی دیوارها، چینه در میانه و خشت‌های ۲۳×۲۳×۵ سانتی‌متر در بالا و در پوشش‌های باقی‌مانده از سقف. این نتایج از گمانه‌ای به ابعاد ۳×۳/۵ متر در داخل و در کف اتاقک بالای برج حاصل شده است.



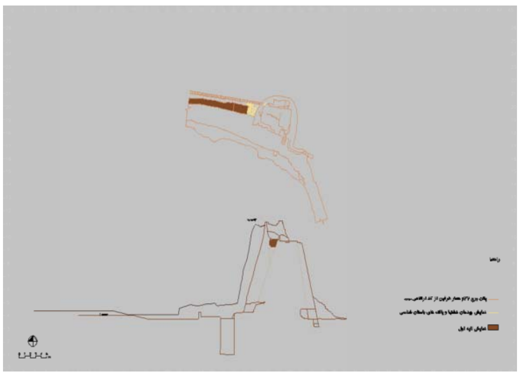
شکل ۵ بخش‌های باقی‌مانده‌ی دیوارهای اتاق روی برج

گمانه‌ی ۲: بالای دیوار شمالی. با هدف مشخص ساختن لایه‌های تشکیل‌دهنده‌ی حصار (دیوار)، و نحوه‌ی اتصال آن با برج، ترانشه‌ای در ابعاد ۱۲۰۰×٦۰۰ سانتی متر ایجاد شد. پس از پاک‌سازی اولیه و برداشتن سطحی‌ترین لایه که خاک باران خورده‌بود، ٤ لایه‌ی عمودی در کنار هم مشاهده شد. لایه‌ی اول، حصار (دیوار) اصلی و قدیمی است که در ابعاد ۱۲۰۰×۳۳۰ سانتی‌متر و از خشت‌های ۳۷×۳۷×۷ سانتی‌متر تشکیل شده‌است. این لایه در قسمت وسط قرار گرفته‌است و دو نمای خارجی و داخلی آن طی کاوش به‌دست آمد. نمای بیرونی، دارای شیبی متوسط به‌طرف خارج است و نمای درونی با شیب بسیار کم تا پایین ادامه پیدا کرده‌است. بر روی دو نمای موجود، لایه‌ی کاهگل نیز مشاهده می‌شود (شکل ٦). لایه‌ی دوم، در قسمت شمال لایه‌ی اول قرار گرفته و از حصار قدیمی تا پای دیوار کنگره‌دار محدود می‌شود و در ابعاد ۱۲۰۰×۱۳۵ سانتی متر است و از گل متراکم و فشرده تشکیل شده‌است (شکل ۷). لایه‌ی سوم، دیوارخشتی دارای کنگره است که در حال حاضر خارجی‌ترین قسمت حصار است. این دیوار دارای

شیب متوسطی است و به‌صورت پوسته‌ای در اطراف حصار اولیه کشیده شده‌است. این لایه از قسمت پایه تا ۵۰ سانتی‌متر بالاتر از بام حصار، از خشت‌های ۷×۳۷×۳۷ سانتی‌متر و سپس تا انتهای کنگره‌های موجود از خشت‌های ۵×۲۳×۲۳ سانتی‌متر تشکیل شده‌است و لایه‌ی کاهگلی نیز بر روی آن دیده می‌شود که در اثر عوامل جوی دچار فرسایش ناشی از نزولات جوی و وزش باد شده‌است (شکل ۸). لایه‌ی چهارم، در قسمت جنوب لایه‌ی اول قرار گرفته و عرض آن ۱۳۰ سانتی‌متر است و از چینه تشکیل شده‌است. در قسمت‌های میانه به پائین، علاوه بر چینه، خشت نیز به‌عنوان لایه‌ی دوم مشاهده می‌شود. این لایه به‌صورت نامنظم و بدون ترتیب و دقت خاصی ساخته شده‌است. لایه‌ی چهارم، لایه‌ی الحاقی‌ای است که از داخل ارگ به‌تناسب فضا و نیاز، به آن افزوده شده‌است (شکل ۹).



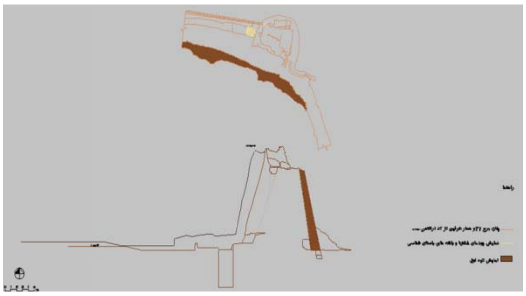
شکل ٦ لایه‌ی اول حصار (دیوار) طبق بررسی‌های باستان‌شناسی



شکل ۷ لایه‌ی دوم حصار (دیوار) طبق بررسی‌های باستان‌شناسی



شکل ۸ لایه‌ی سوم حصار (دیوار) طبق بررسی‌های باستان‌شناسی

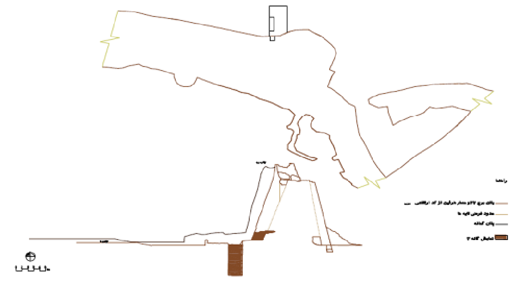


شکل ۹ لایه‌ی چهارم حصار (دیوار) طبق بررسی‌های باستان شناسی

گمانه‌ی ۳: محدوده‌ی غربی برج (بین پایه‌ی برج و حصار شمالی). جهت مشخص شدن پایه‌ی برج، حصار و بستر اصلی آن، گمانه‌ای به ابعاد ۳×۵ متر ایجاد شد (شکل‌های (۱۰) و (۱۱)). پس از برداشت حدود ۰/۵ متر از سطح دامنه‌ی حصار (دیوار)، به پایه‌ی پوسته‌ی برج، که در واقع همان لایه‌ی سوم حصار است و به‌صورت یک لایه‌ی الحاقی، حول حصار قدیمی در قسمت خارجی کشیده‌شده، دسترسی حاصل شد که از خشت‌های ۷×۳۷×۳۷ سانتی‌متر تشکیل شده‌است.

از گمانه‌ی کوچکی که در همین محدوده بر روی این پوسته، با هدف یافتن پایه‌ی حصار قدیمی و عرض پوسته‌ی موجود، ایجاد شد، مشخص گردید که حصار قدیمی در ارتفاع ۰/۷ متر بالاتر از پایه‌ی پوسته و یا لایه‌ی سوم حصار قرار گرفته و بر روی یک لایه‌ی ماسه‌ای ساخته شده‌است. عرض لایه‌ی سوم یا پوسته نیز ۲/۵ متر است. حصار از بالا و قسمت انتهایی حصار با شیب متوسطی به نزدیک پایه رسیده و سپس مقداری عریض‌تر شده و تا پایه ادامه پیدا کرده‌است.

در همین قسمت با هدف رسیدن به بستر اصلی و با فرضیه‌ی بستر سنگی، گمانـه ادامـه پیـدا کـرده و در ارتفاع ۷/۵ متـر از ابتـدای پایـه بـرج بـه کـف سـنگی (ادامه‌ی صخره‌ی سنگی واقـع در زیـر بنـای محـدوده حاکم‌نشین) رسیده‌است.



شکل ۱۰ گمانه‌ی ۳ در محدوده‌ی غربی برج، بین پایه‌ی برج و حصار شمالی و بر روی دامنه‌ی کم‌ارتفاع آن‌ها

گمانه‌ی ٤: بدنه‌ی برج. جهت تکمیل مطالعـات بـرج ۳۲ و با هدف کشف پایه‌ی برج (به‌شکل نـیم‌دایـره) و به‌دست آوردن حدود شیب برج قـدیمی، دو گمانـه در بدنه آن ایجاد گردید.

حفره‌ی شماره‌ی ۱ در میانه‌ی برج به‌صورت افقی ایجاد شد (شکل ۱۱) که پس از حدود ۲ متر دیـواره‌ی منحنی برج همراه با لایه‌ی کاهگل مشاهده گردیـد. در ادامه‌ی جهت رسیدن به پایه‌ی برج، حفره‌ی شماره‌ی ۲ در دامنه‌ی حصار و مماس با برج ایجاد شد (شکل ۱۰) و پس از پیش‌روی به داخل و حذف خشت‌های لایه‌ی بیرونی، در حدود ۲/۵ متر، پایـه‌ی بـرج نیـز مشـخص گردید.



شکل ۱۱ گمانه‌های ۳ و ٤ در نمای خارجی برج. گمانه‌ی ۳ سمت‌راست تصویر و در تقاطع دیوار و برج، حفره‌ی ۱ از گمانه‌ی ٤ در میانه‌ی تصویر و حفره‌ی ۲ از گمانه‌ی ٤ سمت چپ و در میانه‌ی بدنه برج می‌باشند

گمانه‌ی ۵: قسمت داخلی و در پای حصار شـمالی. جهت به‌دست آوردن پایه‌ی حصار (دیوار) شمالی اولیه از داخل و تعیین پی آن، گمانه‌ای در محدوده‌ی داخلی ارگ، در پای حصار و برج (در داخـل لایـه‌ی چهـارم، چینه و خشت الحاقی) ایجاد شد (شکل ۱۲).



شکل ۱۲ گمانه‌ی ۵ در نمای داخلی برج و در پای حصار شمالی

ایـن گمانـه پـس از برداشـت ۱/۳ متـر از لایـه‌ی خشتی، به‌صـورت افقـی، بـه دیـواری از جـنس چینـه رسید. این دیواره در امتداد نمای خشتی داخلی حصـار قدیمی (لایه‌ی اول) است. بـر روی لایـه‌ی متشـکل از چینه، آثار دودزدگی دیـده مـی‌شـود و لایـه‌ی الحـاقی خشتی در جلوی آن قرار گرفته‌است.

دیـواره‌ی چینـه‌ای در واقـع پـی حصـار قـدیمی (لایه‌ی اول) است و آثار دودزدگی بر روی آن نشان از استفاده به‌عنوان نمـای داخلـی حصـار در یـک دوره‌ی زمانی دارد.

خلاصه‌ی فعالیت‌های باستان‌شناسـی. بـا توجـه بـه اطلاعات حاصل از گمانه‌هـا در بـرج ۳۲، نتـایج ذیـل

حاصل آمده‌اند:

۱- فرم نیم‌دایره‌ای برج از نمای خارجی.

۲- چیده‌مان نامنظم خشت‌های قسمت شمالی و هم‌ردیف بودن خشت‌های قسمت جنوبی ترانشه.

۳- وجود پوشش کاهگل در نمای لبه نیم‌دایره تا پایه‌ی برج.



شکل ۱۳ فضای داخلی حفره‌ی ۱ از گمانه‌ی ٤؛ به ترک‌خوردگی ناحیه‌ی بالایی گمانه که تا هسته‌ی برج (در انتهای گمانه) ادامه دارد، توجه شود

٤- تشکیل برج از دو لایه‌ی شامل هسته برج که از پایه تا بالاترین سطح موجود ادامه دارد و پوسته‌ی الحاقی حول آن که با هدف مستحکم‌تر و بزرگ‌تر کردن برج ایجاد شده‌است (شکل ۱۳).

۵- جداشدگی پوسته و لایه‌ی الحاقی خارجی از هسته‌ی برج ناشی از زلزله (لغزش پوسته بر روی هسته‌ی برج).

٦- تشکیل حصار محدوده‌ی غربی برج از چهار لایه شامل دیوار خشتی با عرض ۳/۳ متر (حصار اولیه) در وسط، لایه‌ای از گل متراکم و فشرده که از حصار اولیه تا پای دیوار کنگره‌دار ادامه دارد، دیوار خشتی کنگره‌دار، و دیوار الحاقی چینه‌ای که در محدوده‌ی جنوبی حصار اولیه قرار گرفته است.

۷- نمای خارجی حصار اولیه با پوشش کاهگل بوده و با شیب ملایمی تا پایه ادامه پیدا کرده‌است.

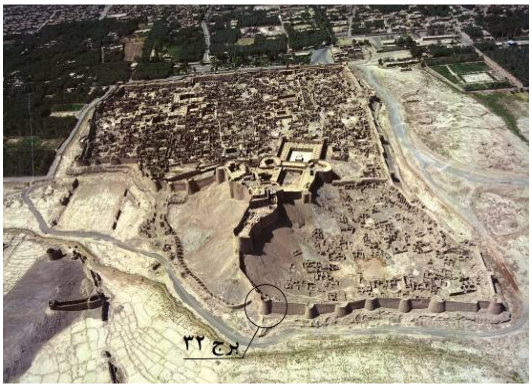
۸- دیوار خشتی دارای کنگره یا لایه‌ی سوم، در بخش خارجی حصار به‌عنوان یک لایه‌ی الحاقی با هدف مستحکم‌تر و عریض‌تر کردن آن، ساخته شده‌است. این لایه هر چه به پایه نزدیک‌تر می‌شود دارای شیب بیشتری می‌گردد و به ضخامت آن افزوده می‌شود.

۹- لایه‌ی دوم جهت پر کردن فضای بین حصار اولیه و دیوار خشتی کنگره‌دار ایجاد شده‌است.

۱۰- دامنه‌ی صخره‌ی سنگی که حاکم‌نشین بر روی آن ساخته‌شده، تا حصار شمالی و بالاخص برج ۳۲ ادامه پیدا کرده‌است.

آسیب‌شناسی برج ۳۲

برج ۳۲ در گوشه‌ی شمال شرقی و در ابتدای شکستگی حصار پیرامونی ارگ بم قرار گرفته است (شکل ١٤). این برج در اثر زلزله در نمای بیرونی دچار ترک‌های برشی برروی پوسته‌ی خارجی خود شده‌است. درحالی‌که در نمای داخلی این ترک‌ها مشاهده نمی‌شوند (شکل ۳) و فقط فروریختگی بخشی از مصالح اتاق فوقانی آن دیده می‌شود. اتاق نگهبانی بالای برج در زلزله، به‌غیر از قسمتی از آن، تخریب شده‌است (شکل ۵). دیوار شرقی بر خلاف دیوار شمالی دچار تخریب وسیعی شده‌است (شکل ٤). در عین حال برج مذکور سالم‌ترین برج در حصار پیرامونی ارگ پس از زلزله محسوب می‌گردد.



شکل ۱٤ عکس‌هوایی از ارگ تاریخی بم؛ موقعیت برج ۳۲ با دایره‌ای حول آن مشخص شده‌است

روش آنالیز

جهت بررسی رفتار برج ۳۲ در مقابل زلزله، آنالیزهای دینامیکی غیرخطی به‌روش المان محدود توسط نرم افزار ANSYS Workbench (v:11) [17] بر روی مدل‌های سه بعدی سازه آن انجام شده‌است. هندسه و ابعاد المان ها پس از آنالیز حساسیت و انجام تعداد زیادی آنالیز بر روی سازه‌ی برج ۳۲ تحت رکورد زلزله‌ی بم انتخاب شد به‌طوری در آخرین مدل، آسیب‌های نشان داده‌شده بسیار نزدیک به آسیب‌های واقعی به‌دست آمد.

جهت بررسی وقوع شکست در سازه (ترک‌خوردگی و یا خردشدگی) مقادیر تنش در نواحی مختلف سازه در سرتاسر زمان زلزله با مقادیر مقاومت‌های مصالح که در جدول (۲) ذکر شده‌اند، مقایسه گردیده‌اند.

بارگذاری

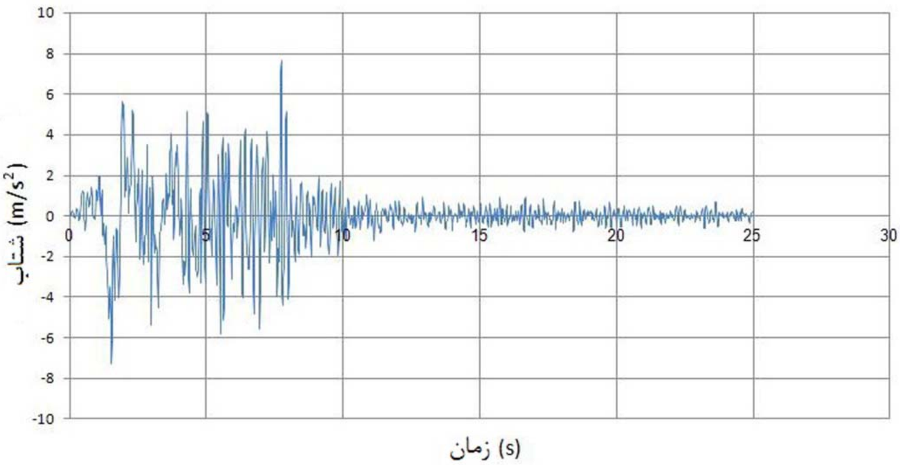
براساس استاندارد ۲۸۰۰ [۱۸]، از سه رکورد زلزله‌ی مقیاس شده، برای آنالیزهای دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی استفاده شده‌است و از نتیجه‌ی بحرانی‌تر در بررسی‌های سازه استفاده گردیده‌است. زمین منطقه‌ی مورد مطالعه طبق استاندارد ۲۸۰۰ از نوع ۲ می‌باشد [۱۹]. با توجه به اطلاعات موجود، سعی شده است از دو شتاب‌نگاشت زلزله‌ی واقعی اتفاق افتاده در مناطق دیگر که تا حد امکان با شرایط تکتونیکی و لرزه‌ای بم مطابقت دارند علاوه بر شتاب‌نگاشت زلزله‌ی بم استفاده شود. رکوردهای زلزله مورد استفاده به‌شرح ذیل است:

۱- مؤلفه‌ی شرقی – غربی رکورد زلزله‌ی پنجم دی ۱۳۸۲ بم- ایران به‌بزرگی ٦/۵ ریشتر (شکل ۱۵).

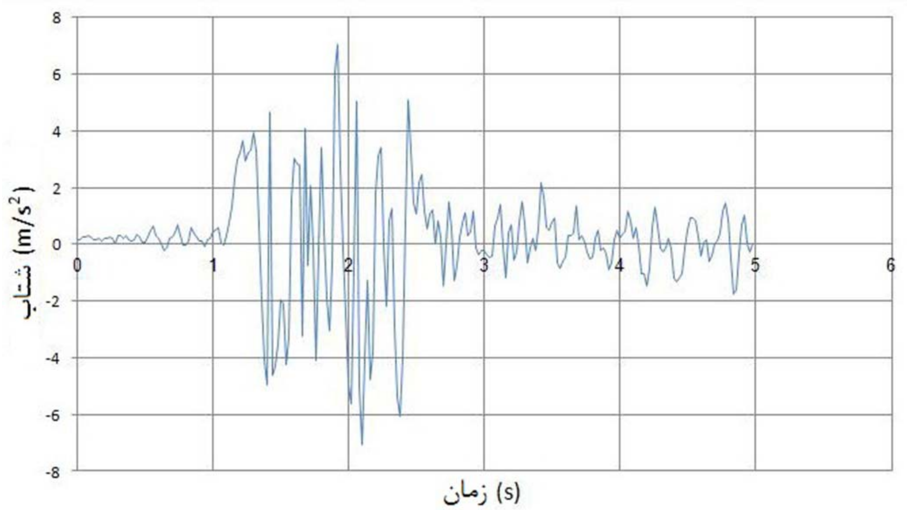
۲- مؤلفه‌ی طولی رکورد زلزله هفدهم فروردین ۱۳۵٦ ناغان به بزرگی ٦ ریشتر و ضریب مقیاس ۰/۸ (شکل ۱٦).

۳- مؤلفه‌ی شمالی – جنوبی رکورد زلزله هجدهم می ۱۹٤۰ السنترو به بزرگی ۷/۱ ریشتر و ضریب مقیاس ۱/۵ (شکل ۱۷).

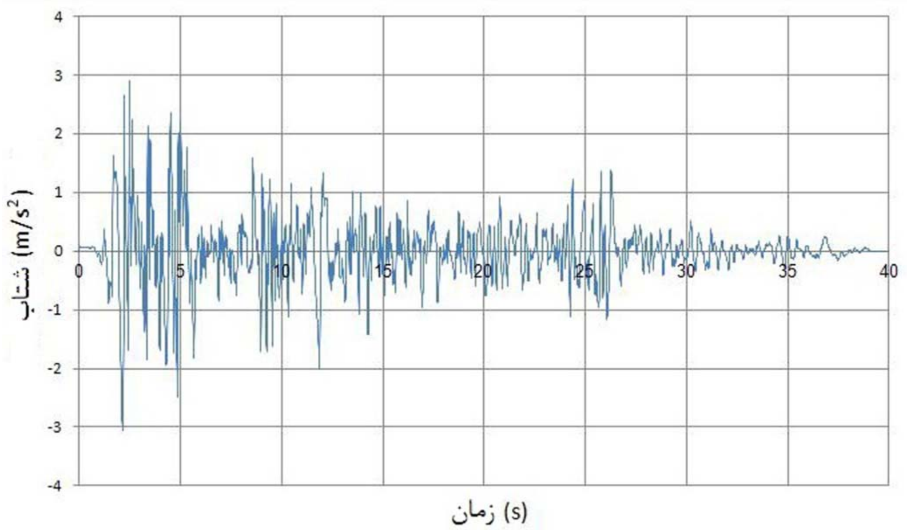
جهت مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها براساس استاندارد ۲۸۰۰، شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده به مقدار حداکثر خود مقیاس شده‌اند. طیف پاسخ شتاب هر یک از شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده با منظور کردن نسبت میرایی ٪۵ ساخته شده‌است. سپس طیف پاسخ در محدوده‌ی زمان‌های تناوب ۰/۲T و ۱/۵T با طیف طرح استاندارد که از حاصل‌ضرب مقادیر ضریب بازتاب ساختمان برای زمین نوع ۲ در پارامترهای نسبت شتاب مبنا (A=۰/۳ پهنه با خطر نسبی زیاد بم) و ضریب اهمیت ساختمان (I=۱/۲ ساختمان‌های با اهمیت زیاد، ساختمان‌هایی که خرابی آن‌ها سبب از دست‌رفتن ثروت ملی می‌گردد) با فرض نسبت میرایی ٪۵ به‌دست می‌آید مقایسه گردیده و ضریب مقیاس آن‌چنان تعیین‌شده که در این محدوده مقادیر طیف‌ها در هیچ حالت کم‌تر از ۱/٤ برابر مقدار نظیر آن در طیف استاندارد نباشد. ضریب مقیاس تعیین‌شده، در شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده (به‌مقدار حداکثر خود) ضرب‌شده و در تحلیل دینامیکی مورد استفاده قرار گرفته‌است.



شکل ۱۵ رکورد زلزله‌ی ۱۳۸۲ بم (مؤلفه‌ی شرقی-غربی) [۱]



شکل ۱٦ رکورد اصلاح‌شده زلزله‌ی ۱۳۵٦ ناغان (ضریب‌اصلاح ۰/۸) [۱]



شکل ۱۷ رکورد اصلاح‌شده زلزله‌ی ۱۹٤۰ السنترو (مؤلفه‌ی شمالی‌جنوبی و ضریب‌اصلاح ۱/۵) [۱]

خصوصیات مصالح

نوع مصالح مورداستفاده در سازه‌ی برج از نوع خشت و گل و در برخی قسمت‌ها آمیخته با کاه می‌باشد. در طرح مرمت ترک‌ها و همین‌طور کنگره‌های برج از المان‌های FRP و شبکه‌های ژئوگرید بهره گرفته شده‌است. خصوصیات مکانیکی مصالح خشتی مشخص شده در جدول (۲)، براساس مطالعات جامع و نتایج آزمایشگاهی بر روی بلوک‌های خشتی ارگ بم [۱۰] حاصل شده‌اند. دیاگرام تنش- کرنش خشت حاصله در شکل (۱۸) از نتایج آزمایشگاه ارگ بم بوده که به‌دلیل عدم قرارگیری نقطه‌ی صفر در مرکز مختصات، بر اساس اصول مقاومت مصالح اصلاح گردیده‌است. مشخصات دینامیکی به‌کار رفته در آنالیزهای لرزه‌ای همین‌طور خصوصیات مکانیکی مصالح FRP و ژئوگرید به‌ترتیب در جداول (۳) و (٤) آورده شده‌اند.

جدول ۲ خصوصیات مکانیکی خشت [۱، ۱۰] و [14,20,21]

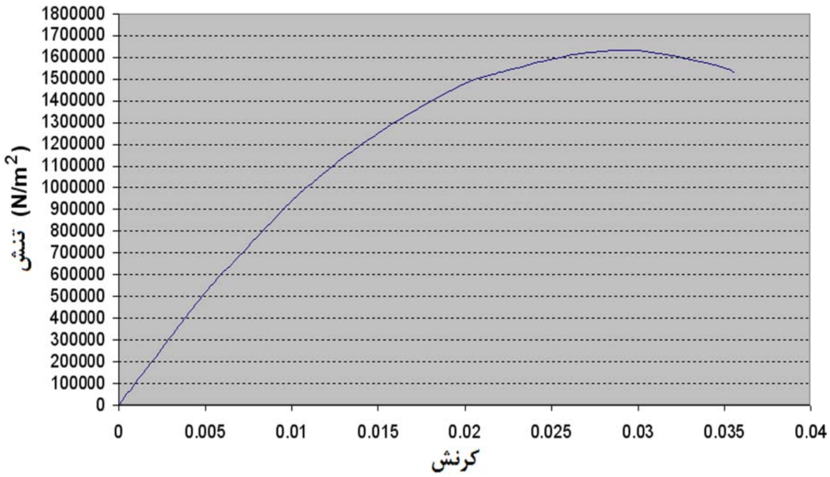
وزن مخصوص (kg/m^3)	۱٦۰۰
مدول الاستیسیته (MPa)	۱۰۵
ضریب پواسون	۰/۱۷
مقاومت فشاری (MPa)	۰/۳٦
مقاومت کششی (MPa)	۰/۰۳٦
مقاومت خردشدگی (MPa)	۰/٤۵
مقاومت ترک‌خوردگی (MPa)	۰/۰٤۵
ضریب‌اصطکاک بین دو سطح خشتی	۰/۲

جدول ۳ خصوصیات دینامیکی به‌کار رفته در آنالیزها [۱]

نوع آنالیز دینامیکی	تاریخچه زمانی
درصد میرایی	۷
شتاب گرانش زمین (m/s^2)	۹/۸۱

جدول ٤ خصوصیات مکانیکی میلگردهای FRP و ژئوگرید [۱]

میلگرد FRP به قطر 22mm	مقاومت کششی (GPa)	۱
	مدول الاستیسیته (GPa)	٤۰
زئوگرید GX 55	مقاومت کششی الیاف (kN/m)	۵۵
	کرنش نظیر مقاومت کششی الیاف (%)	٦/۵
	ضریب کاهش مقاومت کششی	۰/۵



شکل ۱۸ دیاگرام تنش- کرنش اصلاح‌شده خشت‌های قدیمی در ارگ بم [۱]

مدل‌های بررسی شده

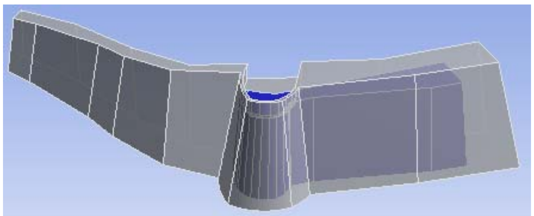
جهت بررسی رفتار دینامیکی و بررسی وضعیت تنش‌ها و همین‌طور موقعیت‌یابی خرابی‌های سازه‌ی برج از آنالیزهای دینامیکی غیرخطی استفاده شده‌است. در آنالیز دینامیکی از سه شتاب‌نگاشت، زلزله‌های بم، ناغان و السنترو که قبلاً به آن اشاره گردید، استفاده شده‌است. رفتار مصالح سازه نیز با معرفی دیاگرام تنش – کرنش غیرخطی (مطابق آنچه در مطالعات و آزمایشات مقاومت مصالح در آزمایشگاه سایت ارگ بم حاصل شده) تعریف گردیده‌است. به‌دلیل آن‌که سازه در قسمت برج و دیوار شمالی آن دارای هسته‌ای با عدم اتصال به پوسته‌ی خود می‌باشد نیاز به مدل‌سازی عملکرد اصطکاکی با درنظر گرفتن ضریب اصطکاکی مناسب برای آن بوده است.

مدل‌های مورد بررسی شامل ۳ حالت مختلف هستند که در ادامه معرفی خواهند شد. جهت بررسی واقع بینانه‌تر سازه، از لحاظ شرایط تکیه‌گاهی دو طرف و همین‌طور اثر وجود دیوارها (اندرکنش بین دیوارها و برج)، دو دیوار کناری برج هرکدام تنها به‌طول ۲۰ متر، یعنی در حدود نصف کل طول هر دیوار، مدل‌سازی شده‌اند. این طول بر اساس آنالیز حساسیت به‌دست آمده‌است.

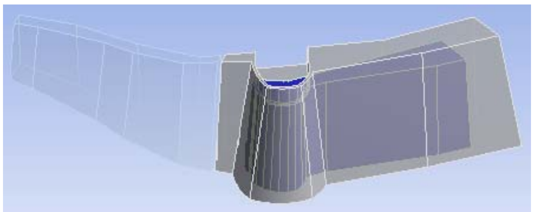
مدل ۱. این مدل شامل وضعیت برج و دیوارهای دو طرف مطابق با وضعیت قبل از زلزله می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱۹) دیده می‌شود دیوار سمت چپ برج (دیوار شرقی) دارای تغییر در ضخامت می‌باشد که در واقع به‌صورت یک نقطه ضعیف و با پتانسیل بالا در تخریب تحت تغییر شکل‌های جانبی به‌نظر می‌رسد.

مدل ۲. این مدل شامل برج و دیوارهای دو طرف مطابق با وضعیت قبل از زلزله ولی با جداسازی دیوار شرقی از برج در ناحیه‌ی تخریب شده (ناحیه‌ی کم‌ضخامت) می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۲۰) دیده می‌شود دیوار سمت چپ (دیوار شرقی) برج از بالا تا پایین با یک شکاف (درز انقطاع) به‌عرض ۰/۵ متر از قسمت انتهایی خود که به برج متصل شده‌است، جدا شده تا اثر عدم اتصال این دیوار ضعیف به برج در کاهش تنش‌ها و خسارات بررسی شود.

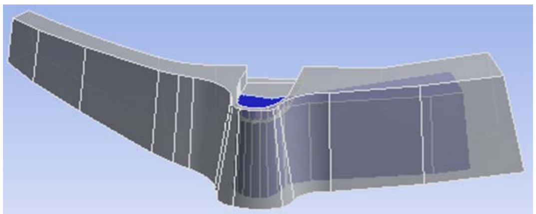
مدل ۳. این مدل شامل برج و دیوارهای دو طرف با اعمال تغییراتی در هندسه دیوارها جهت افزایش تدریجی ضخامت دیوارها در محل اتصال به برج می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۲۱) دیده می‌شود دیوار سمت چپ (دیوار شرقی) برج در تصویر ضخیم‌تر شده و شکستگی‌ها و گوشه‌های تیز که باعث ایجاد تمرکز تنش می‌شوند حذف شده‌اند.



شکل ۱۹ وضعیت شماتیک برج قبل از زلزله با بخشی از دیوارهای کناری (مدل ۱)



شکل ۲۰ وضعیت شماتیک برج قبل از زلزله در حالت دیوار سمت چپ (شرقی) جدا شده توسط درز انقطاع با عرض ۰/۵ متر (مدل ۲)



شکل ۲۱ وضعیت شماتیک برج با اعمال تغییراتی در هندسه‌ی دیوار سمت چپ (شرقی) و در هندسه‌ی اتصال دیوارهای جانبی به برج (مدل ۳)

نتایج آنالیزها

خلاصه‌ی نتایج حاصل‌شده از آنالیز مدل‌های سازه‌ای ۱، ۲ و ۳ تحت زلزله‌های بم، ناغان و السنترو در جداول (۵) تا (۷) آورده شده‌است. کانتورهای ضریب اطمینان در شکل‌های (۲۲) تا (۲٤) نشان داده شده‌اند که در آنها اعداد کم‌تر از ۱ به‌معنای خسارت دیدن سازه و اعداد بزرگ‌تر از ۱ به‌معنای سالم ماندن آن است. بر اساس شکل‌های (۲۲) تا (۲٤)، مدل ۱ (سازه‌ی اولیه بدون تغییر) دقیقاً همان خساراتی را که در زلزله‌ی بم به بنا وارد شده‌است، تجربه می‌کند. نتایج حاکی از آن است که ضعیف‌ترین ناحیه‌ی بنا محل اتصال دیوار شرقی (دیوار سمت چپ در شکل‌های (۲)، (۳)، (٤) و (۲۲)) می‌باشد، که باعث خرابی این دیوار شده‌است. عملکرد مدل ۳ (سازه با تغییرات در هندسه‌ی دیوار شرقی و اتصال دیوارهای جانبی به برج) نشان‌دهنده‌ی اثر بهتری برای بنا نبوده به‌صورتی که هنوز اتصال دیوار شرقی به برج دچار خسارت شده‌است. این در حالی است که جدایی دیوار شرقی از برج (مدل ۲) با یک درز انقطاع به عرض ۰/۵ متر در امتداد ارتفاع دیوار، باعث کاهش خرابی‌ها و خسارات به سازه می‌شود.

جدول ۵ نتایج آنالیز مدل‌های ۱ و ۲ تحت زلزله‌ی بم

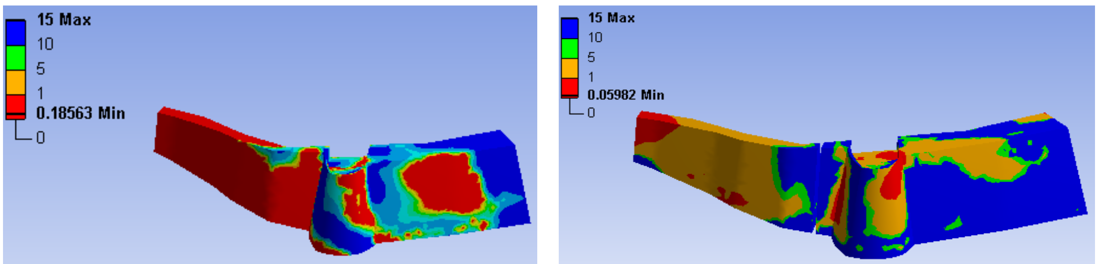
پارامتر مورد بررسی	مدل ۱	مدل ۲	توضیحات
وضعیت آنالیز	کامل‌نشده	کامل‌شده	به‌دلیل ضعف هندسی سازه، مدل ۱ قادر به‌تحمل زلزله نیست.
زمان شروع آنالیز	۰/۰۰	۰/۰۰	خرابی دیوار شرقی در مدل ۱ باعث شده‌است تا آنالیز سازه در زمان ۱/۹٦ ثانیه متوقف شود. جدایی دیوار شرقی از برج در مدل ۲ کمک کرده‌است تا سازه از پس نیروهای ناشی از زلزله برآید و کل زمان آنالیز را پشت‌سر گذارد.
زمان پایان آنالیز (s)	۱/۹٦	۲۵/۰۲	
پریود ارتعاشی سازه در شروع آنالیز (s)	۰/۳۱	۰/۳۲	در هر دو مدل، پریود ارتعاشی تقریباً دو برابر شده‌است در واقع به‌دلیل ترک خوردگی و خردشدگی سختی سازه کاهش یافته‌است.
پریود ارتعاشی سازه در پایان آنالیز (s)	۰/۷۲	۰/٦۱	
تنش کششی حداکثر (MPa)	۰/۰۸	۰/۲	ترک‌خوردگی در هر دو مدل ایجاد شده‌است.
تنش فشاری حداکثر (MPa)	۰/۲	۰/۲	در مدل ۲، تنش فشاری موجود کم‌تر از مقاومت فشاری می‌باشد (جدول ۲)؛ بنابراین، خردشدگی در مدل ۲ به‌وجود نمی‌آید. به‌دلیل کامل نشدن آنالیز در مدل ۱ نمی‌توان در مورد شدت تنش فشاری مقایسه‌ای انجام داد.
تغییر شکل جانبی حداکثر (m)	۰/۰۵	۰/۱	تغییرشکل جانبی در راس سازه در مدل ۲ کم‌تر از حد مجاز شده‌است (یک درصد ارتفاع سازه، ۰/۱۵ متر) [۱۸]. به‌دلیل عدم تکمیل آنالیز در مدل ۱ بررسی تغییرشکل جانبی آن ممکن نیست.
وضعبت کلی سازه براساس کانتورهای ضریب اطمینان	آسیب‌پذیری زیاد (شکل ۲۲)	آسیب‌پذیری کم (شکل ۲۲)	کانتورهای ضریب‌اطمینان (شکل ۲۲)، نشان می‌دهند که مدل ۱ خسارات شدیدی متحمل شده‌است، در حالی‌که خسارت در مدل ۲ بسیار کم‌تر است. در واقع جدایی دیوار شرقی از برج، نقشی برجسته در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه داشته‌است. شدت خرابی‌ها در مدل ۱ بیان‌گر آن است که، دیوار شرقی (سمت چپ برج) سریعاً در زلزله تخریب شده و همین امر باعث عدم تداوم آنالیز لرزه‌ای سازه می‌شود.

جدول ٦ نتایج آنالیز مدل‌های ۱ و ۲ تحت زلزله ناغان

پارامتر مورد بررسی	مدل ۱	مدل ۲	توضیحات
وضعیت آنالیز	کامل‌شده	کامل‌شده	اثر زلزله ناغان بر روی مدل‌ها به‌شدت زلزله‌ی بم نیست، بنابراین آنالیز در هر دو مدل کامل شده‌است.
زمان شروع آنالیز	۰/۰۰	۰/۰۰	
زمان پایان آنالیز (s)	۵/۰۲	۵/۰۲	
پریود ارتعاشی سازه در شروع آنالیز (s)	۰/۳۱	۰/۳۲	پریود ارتعاشی در هر دو مدل تقریباً دو برابر شده، که بیان‌گر کاهش سختی سازه در اثر ترک‌خوردگی و خردشدگی است.
پریود ارتعاشی سازه در پایان آنالیز (s)	۰/۵۹	۰/٦۱	
تنش کششی حداکثر (MPa)	۰/۱۸	۰/۲	ترک‌خوردگی در هر دو مدل ایجاد شده‌است.
تنش فشاری حداکثر (MPa)	۰/۳۳	۰/۲٦	تنش فشاری موجود در سازه در هر دو مدل کم‌تر از مقاومت فشاری مصالح (جدول ۲) است، که در نتیجه آن خردشدگی در سازه محدود می‌باشد.
تغییرشکل جانبی حداکثر (m)	۰/۰۵۳	۰/۰٦	تغییرشکل جانبی در راس سازه هر دو مدل کم‌تر از حد مجاز شده‌است (یک‌درصد ارتفاع سازه، ۰/۱۵ متر) [۱۸].
وضعبت کلی سازه بر اساس کانتورهای ضریب اطمینان	آسیب‌پذیری تقریبا کم (شکل ۲۳)	بدون آسیب (شکل ۲۳)	کانتورهای ضریب‌اطمینان (شکل ۲۳)، نشان می دهند که دیوار شرقی (دیوار سمت چپ) برج در مدل ۲ تا حدودی متحمل خسارت می‌شود، ولی خسارت خاصی به برج و دیوار شمالی (دیوار سمت راست برج) وارد نشده است. شدت خرابی‌ها در مدل ۱ بیان‌گر آن است که دیوار شرقی (سمت چپ برج) سریعاً در زلزله تخریب شده و همین امر باعث عدم تداوم آنالیز لرزه‌ای سازه می‌شود. براساس کانتورهای ضریب اطمینان (شکل ۲۳)، مدل ۲ در زلزله‌ی ناغان دچار آسیب نشده است.

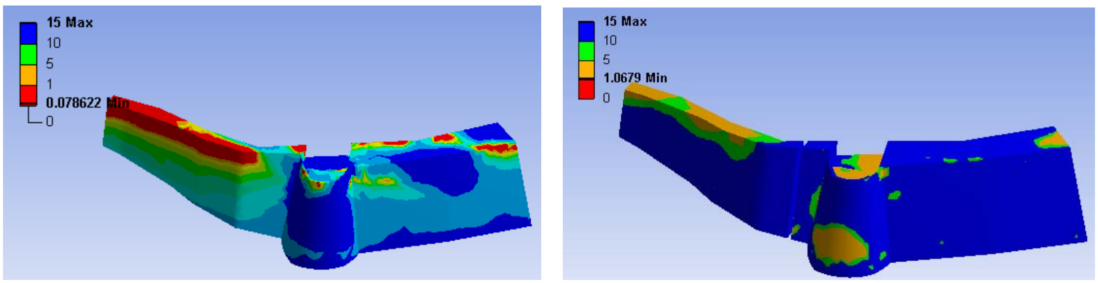
جدول ۷ نتایج آنالیز مدل‌های ۱ و ۲ تحت زلزله‌ی السنترو

پارامتر مورد بررسی	مدل ۱	مدل ۲	توضیحات
وضعیت آنالیز	کامل‌شده	کامل‌شده	اثر زلزله‌ی السنترو بر روی مدل‌ها به‌شدت زلزله‌ی بم نیست، بنابراین آنالیز در هر دو مدل کامل شده‌است.
زمان شروع آنالیز	۰/۰۰	۰/۰۰	
زمان پایان آنالیز (s)	۳۷/۰۶	۳۷/۰۶	
پریود ارتعاشی سازه در شروع آنالیز (s)	۰/۳۱	۰/۳۲	پریود ارتعاشی در هر دو مدل تقریباً دو برابر شده، که بیان‌گر کاهش سختی سازه در اثر ترک‌خوردگی و خردشدگی است.
پریود ارتعاشی سازه در پایان آنالیز (s)	۰/۵۹	۰/۶۱	
تنش کششی حداکثر (MPa)	۰/۳	۰/۳۱	ترک‌خوردگی در هر دو مدل ایجاد شده‌است.
تنش فشاری حداکثر (MPa)	۰/۳	۰/۳	تنش فشاری موجود در سازه در هر دو مدل کم‌تر از مقاومت فشاری مصالح (جدول ۲) است، که در نتیجه‌ی آن خردشدگی در سازه محدود می‌باشد.
تغییرشکل جانبی حداکثر (m)	۰/۱	۰/۱	تغییرشکل جانبی در راس سازه هر دو مدل کم‌تر از حد مجاز شده‌است (یک درصد ارتفاع سازه، ۰/۱۵ متر) [۱۸].
وضعیت کلی سازه بر اساس کانتورهای ضریب‌اطمینان	آسیب‌پذیری کم (شکل ۲۴)	آسیب‌پذیری تقریبا کم (شکل ۲۴)	کانتورهای ضریب‌اطمینان (شکل ۲۴)، نشان می‌دهند که برج و دیوار های دو سمت آن در مدل ۱، در برخی از نواحی بالایی آن‌ها دچار خسارت شده‌اند؛ در مقابل، خسارت در مدل ۲، در ناحیه‌ی پایینی برج و برخی از نواحی بالایی دیوار سمت‌راست برج (دیوار شمالی) رخ داده‌است. شدت خرابی‌ها در زلزله‌ی السنترو کمتر از زلزله‌ی بم بوده است.



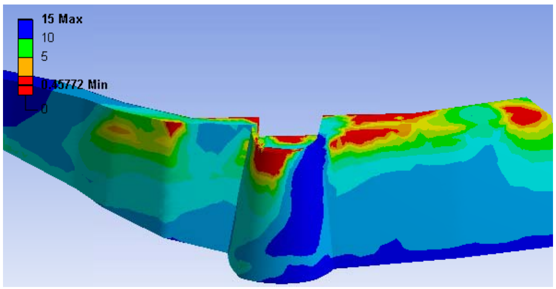
(ب) (الف)

شکل ۲۲ کانتورهای ضریب‌اطمینان سازه در زلزله‌ی بم: الف) مدل ۱، ب) مدل ۲

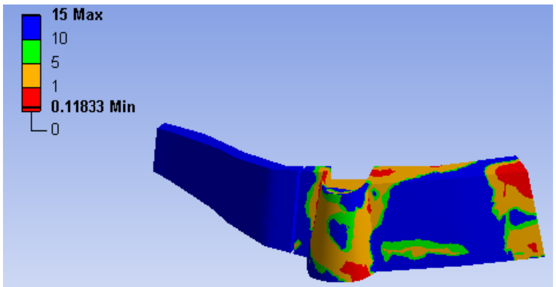


(ب) (الف)

شکل ۲۳ کانتورهای ضریب‌اطمینان سازه در زلزله‌ی ناغان: الف) مدل ۱، ب) مدل ۲

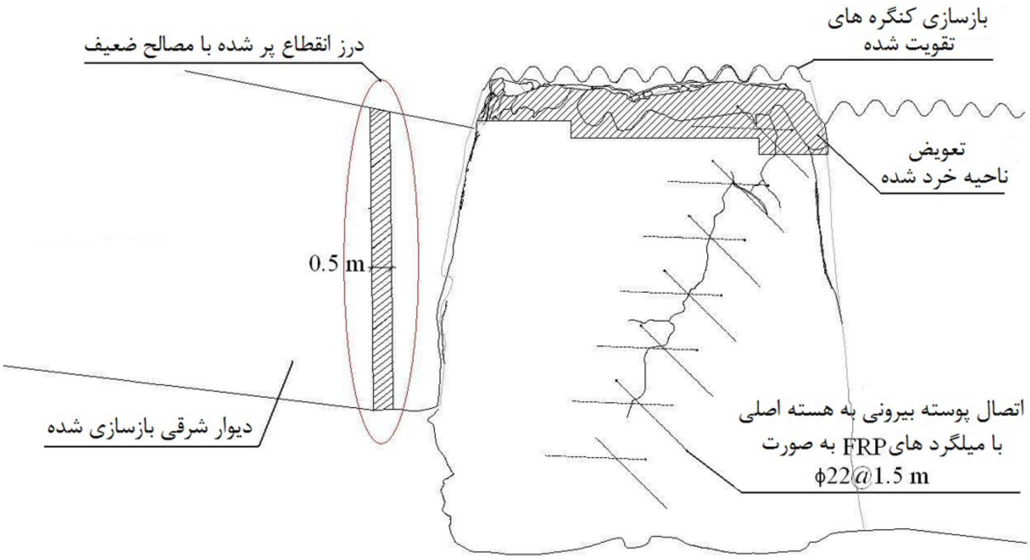


(الف)



(ب)

شکل ٢٤ کانتورهای ضریب‌اطمینان سازه در زلزله‌ی السنترو: الف) مدل ١، ب) مدل ٢



شکل ٢٥ طرح مرمت برج ٣٢ و دیوار شرقی آن

طرح مرمت

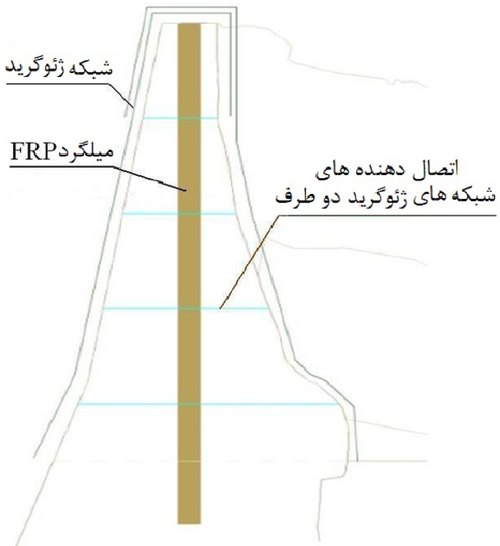
بازسازی دیوار شرقی و درز انقطاع. دیوار تخریب شده‌ی سمت شرقی برج باید توسط آجرهای خشتی بازسازی شود. جهت جلوگیری از وقوع خسارت در زلزله‌های آتی، باید این دیوار توسط یک درز انقطاع به عرض ۰/۵ متر در امتداد ارتفاع دیوار و به فاصله‌ی ۵ متر از برج، جداسازی شود (شکل ٢٥). این درز باید با مصالح ضعیف مانند رس متراکم شده پر شود تا دیوار شرقی در زلزله به‌راحتی و بدون ایجاد سختی، از برج جدا شود و عملکرد مجزا داشته باشد.

مرمت لایه‌ی خارجی برج. خشت‌های خرد شده در لایه‌ی بیرونی برج باید حذف و توسط آجرهای خشتی و ملات گل مشابه جایگزین شوند. ترک‌خوردگی روی این لایه نیز باید توسط میلگردهای FRP (به قطر ۲۲ میلی‌متر) مطابق آن‌چه در شکل ٢٥ مشاهده می‌شود دوخته شوند. این میلگردها باید به طول حداقل ۱/۵ متر در بدنه برج به‌صورت مورب کاشته شوند (توسط سوراخ‌کاری با مته‌ی مخصوص و سپس تزریق ملات مناسب و سازگار با مصالح سازه به‌داخل سوراخ‌ها و در نهایت جای‌گذاری میلگردهای FRP)، تا میلگرد به‌طور کامل دو طرف لایه‌ی ترک‌خورده‌ی خارجی

(به‌ضخامت ۱/۵ متر) را به‌هم وصل کند. ملات مورد استفاده برای ایجاد گیرایی بین میلگردهای FRP و خشت دارای پایه‌ی خاک و آهک با ترکیب مخصوص می باشد که قبلاً در پروژه‌ی دیگری در ارگ بم طراحی شده و به‌دست آمده‌است [۱۰]. مؤثر بودن استفاده از میلگردهای FRP و مقادیر طول‌های لازم برای گیرایی آنها نیز قبلاً در چند پروژه‌ی دیگر در ارگ بم به اثبات رسیده‌است [21 و ۱۰، ۱].

بازسازی و تقویت کنگره‌ها. اکثر کنگره‌های روی برج و باروهای ارگ بم به‌دلیل ضعف مصالح خشت در خمش ناشی از تغییرشکل‌های جانبی و عدم اتصال مناسب به بدنه برج‌ها و دیوارها، در زلزله تخریب شده‌اند. از این رو کنگره‌های تخریب‌شده برج ۳۲ و دیوار شرقی آن باید بازسازی و تقویت شوند. این تقویت با جاگذاری و تعبیه یک میلگرد FRP به‌صورت عمودی (به قطر ۲۲ میلی‌متر و طول ۱/۸ متر) در میانه‌ی هر کنگره انجام می‌شود. سپس روی خشت‌های کنگره یک لایه ژئوگرید (در دوطرف هر کنگره) مطابق شکل (۲۶) قرارگرفته و توسط اتصال دهنده‌های مناسب در میانه هر کنگره این مش بندی دوطرفه به‌هم وصل می‌شود تا درگیری کافی بین ژئوگرید و خشت جهت عملکرد توام در خمش به‌وجود آید. جهت حفظ اصالت منظر، برای نماسازی یک لایه کاهگل کنگره‌ها را به‌صورت کامل پوشش می‌دهد.

استفاده از مصالح غیرطبیعی مانند FRP و ژئوگرید به‌جای چوب یا الیاف‌های طبیعی ساخته شده از درخت خرما و یا مصالح مشابه، در طرح تقویت و مرمت بنا به‌دلیل آن است که از پوسیدگی و خوردگی و در نتیجه نابودی المان‌های تقویت در اثر عوامل جوی یا موریانه جلوگیری شود. از طرف دیگر آنالیزهای سازه‌ای نشان دهنده‌ی آن بوده است که چوب با ابعاد کوچک (به‌طوری که قابلیت جاگذاری بدون تأثیر بر اندازه کنگره‌ها را داشته باشد) مقاومت و سختی لازم را جهت عملکرد مناسب کنگره‌های سازه فراهم نمی‌سازد.



شکل ۲۶ تقویت کنگره‌ها با میلگردهای FRP و الیاف ژئوگرید

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مطالعات انجام گرفته در پروژه مرمت برج ۳۲ در ارگ بم به‌شرح زیر است:

۱- سازه‌ی برج را نباید دقیقاً به‌صورت وضعیت قبل از زلزله مرمت نمود، زیرا همان محل‌های آسیب‌دیده‌ی فعلی مجدداً دچار آسیب و تخریب خواهد شد. زمان وقوع تخریب ۱/۹۶ ثانیه بعد از وقوع زلزله‌ای مشابه زلزله‌ی بم می‌باشد.

۲- ضعیف‌ترین ناحیه‌ی سازه‌ی محل اتصال دیوار شرقی به‌برج ۳۲ می‌باشد، که باعث خرابی این دیوار شده‌است. حتی با تغییر در هندسه‌ی ناحیه‌ی اتصال نیز نمی‌توان از تمرکز تنش و خرابی در این ناحیه جلوگیری کرد.

۳- ایجاد یک درز انقطاع به‌عرض ۰/۵ متر در کل ارتفاع دیوار شرقی و به فاصله‌ی ۵ متری از برج

می‌تواند رفتار لرزه‌ای سازه را به میزان زیادی بهبود بخشد. این درز با مصالحی ضعیف پر شده و سپس نواحی تخریب‌شده دیوار شرقی بازسازی خواهند شد. در این حالت، در اثر وقوع زلزله‌ای شبیه به زلزله‌ی بم حداکثر تنش‌های فشاری ایجاد شده برابر ٥٦ درصد مقاومت تنش فشاری مصالح است ولی در برخی از قسمت‌ها تنش‌های کششی از مقاومت کششی مصالح تجاوز می‌کنند و باعث ایجاد خسارات جزیی می‌شوند که به‌سادگی قابل مرمت خواهد بود.

٤- به‌منظور مرمت برج ۳۲، خشت‌های خرد شده روی جداره‌ی بیرونی برج باید حذف و جهت جایگزینی از آجر و ملات خشتی سازگار با بنا استفاده شود. قسمت‌های ترک‌خورده روی این جداره نیز با میلگردهای FRP (که پوسته‌ی برج را به هسته آن وصل می‌کنند) دوخته می‌شوند. کنگره‌های تخریب شده روی برج و همین‌طور دیوار شرقی با میلگردهای FRP (جهت افزایش سختی و اتصال به بدنه برج یا دیوار) و الیاف ژئوگرید (جهت افزایش قابلیت خمش پذیری) تقویت و بازسازی خواهند شد.

قدردانی

این کار با حمایت مالی حاصل از قرارداد شماره‌ی ۸۳/۹٤۹ مورخ ۱۳۸٤/۲/۳ بین نویسنده‌ی اول (عضو هیئت علمی دانشگاه اصفهان به‌عنوان موسسه‌ی پژوهشی) و پروژه‌ی نجات بخشی میراث فرهنگی بم (سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری کشور به‌عنوان کارفرما) با موضوع پروژه‌ی مطالعه و آسیب‌شناسی دیوار شمالی و ارائه‌ی طرح مرمت برج ۳۲ انجام شده‌است.

مراجع

۱- حجازی، مهرداد، "پروژه مطالعه و آسیب شناسی دیوار شمالی و ارائه طرح مرمت برج ۳۲"، گزارش نهایی، دانشگاه اصفهان و سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری کشور، اصفهان و بم، (۱۳۸۹).

2. Hejazi, M., Mokhtari, E., Tehrani, F., Shirazi, B. and Khatooni, N., "Preliminary structural studies of the adobe tower No. 32 of the Bam citadel", *Proceedings of the 10th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage (Terra2008)*, Bamako, (2008).

3. Vargas, J., Blondet, M., Ginocchio, F. and García, G., "35 Años de investigaciones en sismo adobe: la tierra armada", *International Conference SismoAdobe 2005*: Architecture, Construction and Conservation of Earthen Buildings in Seismic Areas, Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, (2005).

4. Leroy Tolles, E., Kimbro, E. E., Webster, F. A. and Ginell, W. S., "Seismic stabilization of historic adobe structures: final report of the Getty Seismic Adobe Project", *J. Paul Getty Trust*, Los Angeles, CA, (2000).

5. Leroy Tolles, E., Kimbro, E. E. and Ginell, W. S., "Planning and engineering guidelines for the retrofitting of historic adobe structures", *J. Paul Getty Trust*, Los Angeles, CA, (2002).

6. Avrami, E., Guillaud, H. and Hardy, M., "Terra literature review: an overview of research in earthen architecture conservation", *J. Paul Getty Trust*, Los Angeles, CA (2008).

7. Noguez, R. and Navarro, S., "Reparación de muros de adobe com el uso de mallas sintéticas", *International Conference SismoAdobe 2005*: Architecture, Construction and Conservation of Earthen Buildings in Seismic Areas, Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, (2005).

8. Yamin, L., Phillips, C., Reyes, J., Rivero, S. and Ruiz, D., "Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada", Revista de Estudios sobre Património, *Journal of Cultural Heritage Studies*, ISSN 1657-9763, (2007).

9. Figueiredo, A., Varum, H., Costa, A., Silveira, D. and Oliveira, C., "Seismic retrofitting solution of an adobe masonry wall," *Materials and Structures*, Vol. 46 (1-2), pp. 203-219, (2013).

١٠- مهندسین مشاور خدمات مهندسی مکانیک خاک، "استحکام بخشی و دوخت و دوز سازه های خشتی ارگ بم"، گزارش های شماره ١ تا ٣، تهران، (١٣٨٥).

١١- حجازی، مهرداد، "مرمت و بازسازی یک حجره خشتی در بازار ارگ بم"، گزارش نهایی، دانشگاه اصفهان و سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری کشور، اصفهان و بم، (١٣٨٩).

12. Hejazi, M. and Mehdizadeh Saradj, F., "Persian Architectural Heritage: Architecture", WIT Press, Southampton and Boston, (2014).

13. Hejazi, M. and Mehdizadeh Saradj, F., "Persian Architectural Heritage: Conservation", WIT Press, Southampton and Boston, (2014).

14. Hejazi, M. and Mehdizadeh Saradj, F., "Persian Architectural Heritage: Structure", WIT Press, Southampton and Boston, (2014).

15. ICOMOS, "International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites (the Venice Charter 1964", *International Council on Monuments and Sites* (ICOMOS), Paris, (1964).

16. ICOMOS, "Recommendations for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage (the Barcelona Charter 2005)" , International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) – International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage (ISCARSAH), Paris, (2005).

17. Zecher, J. and Dadkhah, F., "ANSYS Workbench Software Tutorial with Multimedia CD Release 11", Schroff Development Corporation, New York, (2008).

١٨- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، "آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، استاندارد ٢٨٠٠"، ویرایش سوم، تهران، (١٣٨٤).

١٩- زارع، مهدی، "گزارش مقدماتی شناسایی مناطق زلزله بم"، سایت اینترنتی پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران.

20. Vargas, J., Blondet, M. and Tarque, N., "Summary of building codes for earthen buildings in seismic areas: the Peruvian experience", *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, (2006).

21. Hejazi, M., "Historical Buildings of Iran: their Architecture and Structure", *Computational Mechanics Publications (WIT Press)*, Southampton and Boston, (1997).